干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

咸海流域陆地水储量时空变化研究

吕 叶[1,2,3]， 杨 涵[1]， 黄 粤[2,3]， 包安明[2,3]， 昝婵娟[2,3]， 李文静[1,2,3]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 新疆维吾尔自治区遥感与地理信息系统应用重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：采用2002—2016年GRACE（Gravity recovery and climate experiment）重力卫星JPL-RL06M数据分析咸海流域陆地水储量变化（Terrestrial water storage change, TWSC）时空变化特征，并结合CRU TS4.03气象数据、GLDAS-Noah地表蒸散发数据和高精度土地利用数据探究气候变化与人类活动对陆地水储量的影响。结果表明：（1）2002—2016年咸海流域陆地水储量变化呈现-3.20 $mm \cdot a^{-1}$下降趋势，春、夏季陆地水储量呈盈余态势，秋、冬季呈现亏损状态；水储量变化在空间上表现为中部和东部盈余，周边亏损的特征。（2）2002—2016年咸海流域降水量呈-1.14 $mm \cdot a^{-1}$下降趋势，地表温度呈0.11 ℃$\cdot a^{-1}$上升趋势；相比气温，水储量变化与降水量相关性更强。（3）2000—2015年，咸海流域耕地面积小幅增加1.65×10^4 km^2，水域面积减少；农作物耗水和灌溉需水的增加加剧了咸海流域水量支出，咸海流域蒸散发呈21.63×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$增加态势，在空间上与陆地水储量变化的相关系数最高达0.74，是影响陆地水储量变化的主要因素之一。

关 键 词：咸海流域；陆地水储量；气候变化；土地利用变化

文章编号：

咸海曾是中亚最大的内陆湖，水面面积曾超过6.70×10^4 km^2，流域面积约190×10^4 km^2。由于远离海洋，其水资源以积雪和冰川融雪补给为主，水文系统脆弱[1]，对气候变化的响应极为敏感[2-5]。20世纪60年代以来，阿姆河与锡尔河流域大规模的水土资源开发和不可持续的灌溉方式，导致咸海湖面快速萎缩，生态环境急剧恶化。“咸海危机”已成为20世纪人类活动引起的最严重生态环境问题之一，受到国际社会的广泛关注。充分了解咸海流域水资源的交换过程和赋存方式，探明区域水资源储量及其时空演变规律，对咸海流域水资源管理和生态保护有重要意义。

以往咸海流域水资源变化研究多基于传统气象水文观测资料[6-7]，在观测站点稀少且观测不连续的条件下，对湖泊地区降水量[8]、蒸发、径流等进行分析，很难准确评估区域水资源的时空变化。近年来利用多源遥感数据，结合地基观测或建立耦合模型、水量平衡模型，可提取地表水循环要素的时空变化信息，但主要是对水域面积和水位变化[9-10]，以及蒸发[11-12]等特定成分研究，而对陆地水循环过程中河川径流、地下水等要素缺乏适用性。2002年发射的GRACE（Gravity recovery and climate experiment）重力卫星，能够可以连续、快速、大尺度地探测由地球表面和内部质量迁移造成的重力变化，进而监测地表水储量[13-14]和地下水[15]变化，目前已经成功应用于监测全球[16]、区域[17-18]和流域[19]尺度的陆地水变化。基于GRACE卫星时变重力场的地表质量变化反演方法按照反演原理的不同主要分为2类：球谐系数反演方法和Mascon（Mass concentration）方法。球谐系数法原理简单、编程实现容易，

收稿日期：2020-08-10； **修订日期**：2020-11-04

基金项目：第三季环境变化与绿色丝绸之路建设（XDA2006030102）；国家重点研发计划（2017YFC0404501）；中国科学院创新交叉团队项目（JCTD-2019-20）；中国科学院国际合作项目（131551KYSB20160002）资助

作者简介：吕叶（1995-），女，硕士研究生，主要从事资源环境遥感研究. E-mail: 1294096731@qq.com

通讯作者：杨涵（1980-），女，硕士研究生导师，主要从事遥感应用方面的研究. E-mail: 59016798@qq.com

但受GRACE卫星载荷的仪器测量误差、混频误差及卫星轨道特性影响,直接使用时变重力场模型的球谐系数法反演结果存在严重的南北方向条带误差,必须对球谐系数进行滤波处理[20-22]。基于点质量模型原理构建卫星间距离变率观测值和地表区域网格质量变化的直接函数关系式,建立Mascon方法;已有研究表明,与球谐系数法反演结果相比,Mascon模型解能提高反演结果信噪比值,空间分辨率更高,保留更多有效信号,与GLDAS(Global land data assimilation system)水文模型结果相关性更好[23];不同Mascon模型解中,JPL(Jet propulsion laboratory)发布的Mascon模型解信噪比值较大,与GLDAS水文模型时间序列相关性较好。

因此,本文选取中亚咸海流域为典型研究区,采用2002年1月至2016年12月GRACE陆地水储量(Terrestrial water storage,TWS)Mascon解数据,结合GLDAS-Noah模型的地表蒸散发数据以及CRU(Climate Research Unit)发布的降水、气温数据,分析了咸海流域及其各分区近15 a陆地水储量变化(Terrestrial water storage change, TWSC)趋势,并探讨了气候变化与人类活动对其影响。研究结果将有助于从宏观上了解中亚内陆湖流域水资源变化特征,为水资源的合理分配与管理提供依据。

1 研究区概况

咸海流域位于亚欧大陆腹地,介于58°70′~62°20′E,41°16′~46°52′N之间,总面积约123×10^4 km^2(图1)。流域地貌格局清晰,变化多样,地形呈现东高西低的特点。西部和西北部为图兰平原,其间分布卡拉库姆沙漠和克孜勒库姆沙漠;东部和东南部为天山和帕米尔高原高山区,是主要的产流区[24-25]。流域具有典型的大陆性气候特点,年平均降雨量不足300 mm,暴雨极值区为费尔干纳西南坡,超过2000 mm,而咸海附近和沙漠区年平均降雨量不足100 mm[26]。

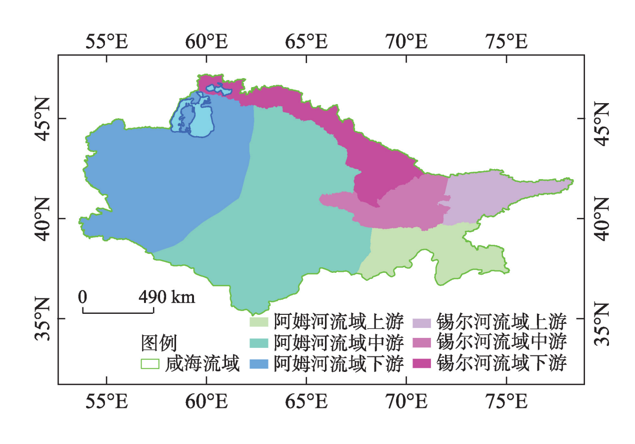


图1 咸海流域

Fig. 1 The Aral Sea Basin

地表水主要由阿姆河和锡尔河两大水系构成。其中,阿姆河发源于阿富汗与克什米尔地区交界处兴都库什山脉北坡维略夫斯基冰川[26],从源头到铁尔梅兹灌区划分为阿姆河流域上游,以东西走向的高大山脉为主,中下游分区以Tujamuin水文站点为界,下游为地势平坦的荒漠绿洲,流域内地势落差较大,海拔由西向东逐渐升高[27]。锡尔河发源于吉尔吉斯境内天山山区,上游的2条主要支流纳伦河与库瓦河在费尔干纳汇合后称为锡尔河[1],从河源到费尔干纳盆地出口为锡尔河流域上游,费尔干纳盆地出口至恰尔达拉水库为中游,恰尔达拉水库至河口为下游。两河流域中下游地区适宜的气候条件和丰富的土地资源,非常适合发展灌溉农业[6]。20世纪60年代以来,由于乌兹别克斯坦和哈萨克斯坦两国大规模的耕地扩张,改变了咸海流域的水量平衡状态,水资源配置的变化导致两河注入咸海水量显著减少,咸海湖泊面积急剧萎缩、水位持续降低,生态环境问题愈演愈烈。

2 数据与方法

2.1 数据来源

GRACE陆地水储量数据为JPL发布的RL06M数据,时间跨度为2002年1月至2016年12月共180个月,由于卫星自身原因和测量误差等因素的影响,本文实际获得该时段的156个月份数据,缺失24个月份数据。为了保证数据结果的准确性,将24个缺失月份的数据记为空值,不进行插补,空间分辨率为0.5°×0.5°,时间分辨率为1个月(https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/jpl_global_mascons/)。

GLDAS陆面同化数据为Noah模式模拟的陆表蒸散发数据(https://disc.gsfc.nasa.gov/)产品,空间分辨率为1°×1°,时间分辨率均为3 h,下载数据时段与GRACE卫星数据一致。

气象数据采用英国East Anglia大学CRU发布的CRU TS4.03数据(http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/),下载时段为2002年1月至2016年12月,空间分辨率为0.5°×0.5°的气温和降水月数据。

土地利用数据采用中国科学院“地球系统科学数据共享平台-新疆与中亚科学数据共享平台”发布的2000、2015年中亚土地利用数据，该数据集参照2000年TM影像和2015年OLI影像，采用人工目视解译技术进行修改和确认后获得。解译结果将研究区分为耕地、林地、草地、城乡居民工矿用地、水域、未利用土地6个一级类。

2.2 研究方法

2.2.1 GRACE时变重力场反演水储量变化计算方法　Watkins等[22]在全球范围内划定了4551个质量均匀分布的3°等面积球帽(MASCON)，利用JPL重力场Level-1数据，通过加权最小二乘方法得到每个球帽的等效水柱高值。本研究基于GRACE卫星时变重力场模型数据输出为经纬网节点数据，利用ArcGIS平台进行区域统计分析，所需要的工具包括：Make NetCDF Raster Layer、Zonal Statistic as Tabled、Band Collection Statistics，输出流域水储量变化栅格图，通过计算得到各年月份流域水储量变化统计表[28]。

2.2.2 时间序列趋势分析方法　本文采用线性趋势法描述陆地水储量、降水量、气温、蒸散量时间序列的趋势性变化。对流域内CRU降水量和气温数据以及GLDAS-Noha 1°×1°蒸散发数据进行2002—2016年际变化空间趋势分析。长期变化趋势的显著性检验采用Mann-Kendall检验法[29]。

2.2.3 空间相关性分析　陆地水储量变化与降水量以及地表温度之间关系的研究采用基于栅格的空间相关性分析方法，通过逐个像元计算陆地水储量与降水量、地表温度等之间的相关系数来表征陆地水储量与其他因子的相关性，计算公式如下：

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中：设定有x和y两组要素的n对观测资料x_1、x_2、…、x_n和y_1、y_2、…、y_n；n是样本数；$\bar{x}$是变量x的平均值；$\bar{y}$是变量y的平均值。当r_{xy}为正值时，表示x与y之间正相关，r_{xy}为负值时，表示x与y之间负相关。一般情况下，$|r|=1.0$表示完全相关；$0.8<|r|\le1.0$表示高度相关；$0.5<|r|\le0.8$表示显著相关；$0.3<|r|\le0.5$表示低相关；$0.0<|r|\le0.3$表示微弱相关；$|r|=0.0$表示完全不相关。

3 结果与分析

3.1 咸海流域陆地水储量时空变化

3.1.1 陆地水储量的年际和年内变化　图2a~b展示了2002年1月至2016年12月咸海流域陆地水储量年际和年内变化。从年际变化来看，近15 a咸海流域水储量整体以−3.20 mm·a^{-1}速率呈显著下降趋势($P<0.05$)；最大盈余出现在2005年3月，高达81.05 mm，最大亏损出现在2008年10月，为−91.29 mm(图2a)。从年内变化来看，陆地水储量变化的峰值多出现在4月或5月。春季(3—5月)和秋季(9—11月)陆地水储量变化高于夏季(6—8月)和冬季(12月—次年2月)(图2b)。

3.1.2 陆地水储量的空间变化　2002—2016年咸海流域陆地水储量呈现中部腹地和东部盈余，周边亏损的特征；其中流域北部和西部水量亏损程度大于南部地区，特别是在土库曼斯坦境内及乌兹别克斯坦境内的咸海地区，陆地水储量的亏损更为显著，而水储量的盈余则主要出现在流域东部山区以及阿姆河流域中游的灌区(图3)。

为了解咸海流域陆地水储量的时空变异特征，将咸海流域划分为阿姆河流域和锡尔河流域，并依据流域地貌、水文站点和灌区分布，划定了阿姆河流域和锡尔河流域的上、中、下游分区。按照区域

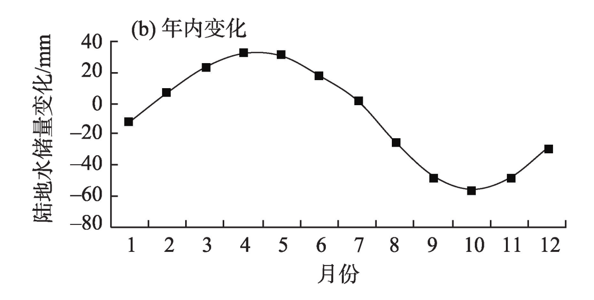


图2　2002—2016年咸海流域陆地水储量年际和年内变化

Fig. 2　Interannual and intra-annual changes of TWSC in the Aral Sea Basin from 2002 to 2016

划分提取陆地水储量的变化序列，结果表明：阿姆河流域和锡尔河流域水储量均呈显著下降趋势（图4a~b），变化速率分别为−2.91 mm·a^{-1}和−5.18 mm·a^{-1}（P<0.05，2008年后P<0.01）。除阿姆河流域中游水储量变化呈1.79 mm·a^{-1}小幅增加外（图4e），其他5个分区陆地水储量均呈减小趋势；其中阿姆河流域下游减小幅度最大，变化速率达−7.36 mm·a^{-1}（图4g），阿姆河流域上游和锡尔河流域上游分别以−7.28 mm·a^{-1}、−3.81 mm·a^{-1}速率减小（图4c~d）。锡尔河流域上、中、下游陆地水储量减小幅度为：上游<下游<中游（图4d、4f、4h）。

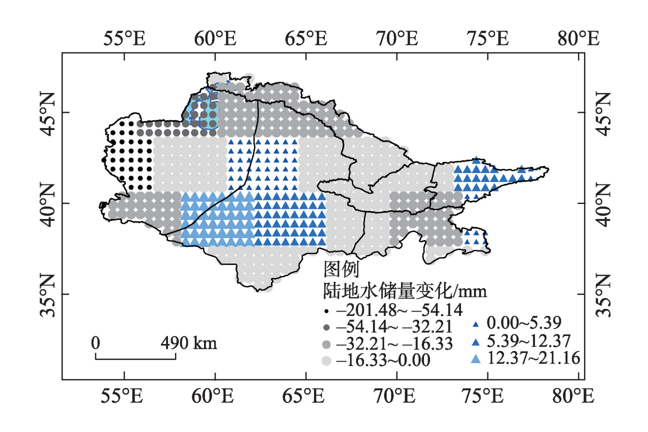


图3　2002—2016年咸海流域陆地水储量变化空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of TWSC in the Aral Sea Basin from 2002 to 2016

3.2　环境变化对咸海流域陆地水储量的影响

3.2.1　咸海流域陆地水储量对气候要素的敏感性

气候变化与人类活动是影响咸海流域水储量变化的主要因素。本研究选取降水量、气温为主要气候因子，分析其与陆地水储量的关系。

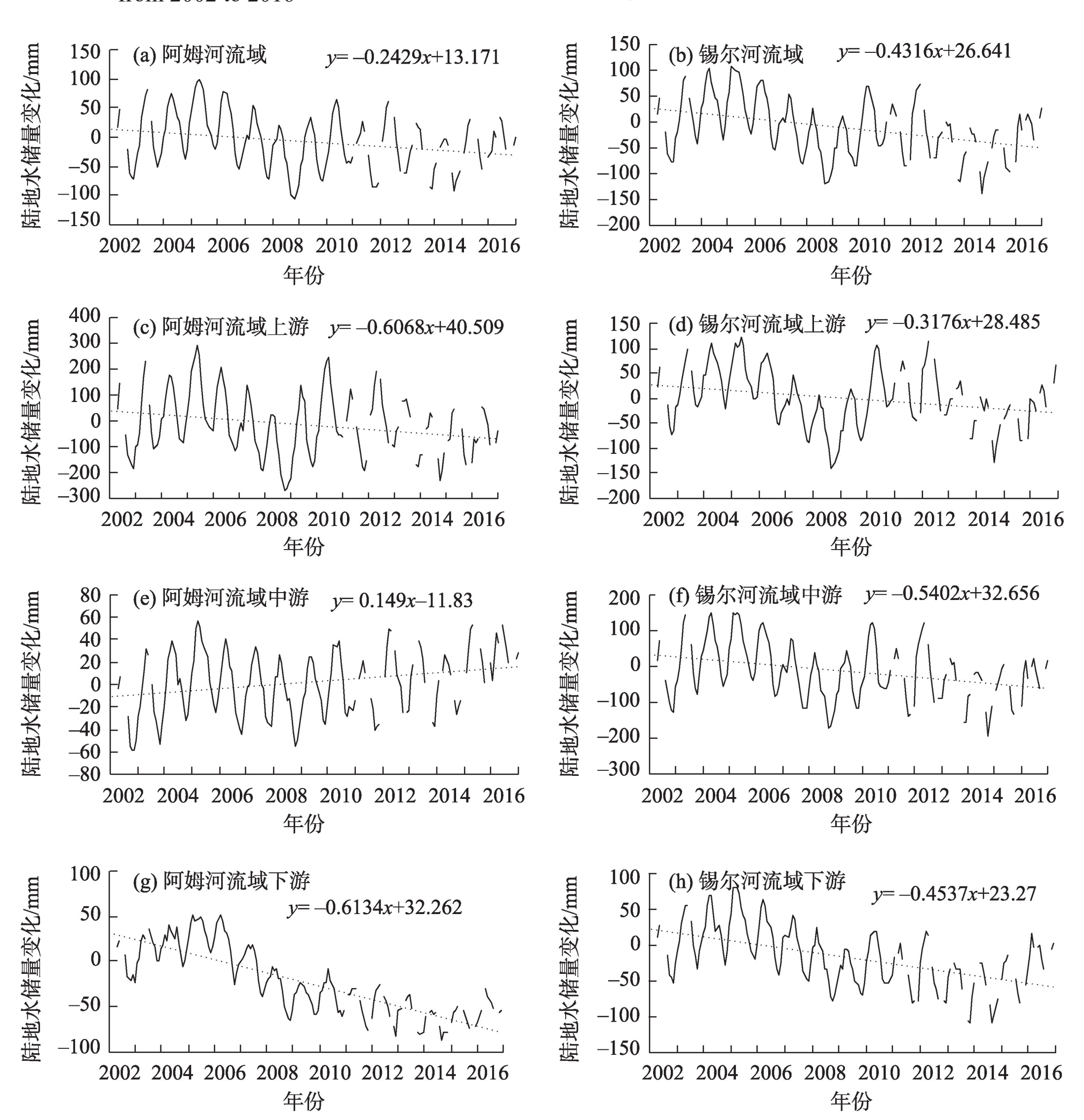


图4　咸海流域及其分区陆地水储量的年际变化

Fig. 4　Interannual change of TWSC in the Aral Sea Basin and its sub-region

2002—2016年咸海流域降水量整体呈减小趋势(图5a)，减小速率约为-1.14 mm·a^{-1}；减少最明显在咸海流域东部(-8.22 mm·a^{-1})；降水量增加最明显的地区出现在锡尔河流域和阿姆河流域的下游，增幅可达2.67 mm·a^{-1}(图5c)；2002—2016年咸海流域的地表温度呈上升趋势，上升速率为0.11 ℃·a^{-1}(图5b)，其中下降明显的地区为阿姆河流域下游中部，达-0.03 ℃·a^{-1}；地表温度最大增幅在阿姆河流域南部约0.05 ℃·a^{-1}(图5d)。咸海流域陆地水储量和降水量的相关系数整体上多呈正相关关系，中下游灌区和南部以及东部山区的相关系数较高(图5e)；正相关出现在流域上游和中部区域，负相关主要出现在锡尔河流域下游与阿姆河流域中游地区和阿姆河流域下游的少部分地区。陆地水储量与地表温度在正相关区域主要集中在锡尔河流域中下游地区以及与阿姆河流域中、下游交汇处，而负相关则主要分布在两河流域的上游地区以及阿姆河流域的南部和下游的西南部(图5f)。总的来说，2002—2016年咸海流域降水减少导致水量收入减少，而气温升高可引起蒸散发增加导致水量支出增加，这与陆地水储量的整体减小趋势一致；降水量和气温在一定程度上影响流域的陆地水储量的季节性变化，但气温与陆地水储量的相关系数和显著性并不高；相比气温，水储量与降水量的相关性更强。

3.2.2　土地利用变化对咸海流域陆地水储量的影响　咸海流域5个国家的灌区面积从1970年开始迅速增长，1991年苏联解体后，各国水资源开发利用与管理体制发生了很大变化，耕地开垦的强度和速度较前期而言都大幅降低，以缓慢增加和小幅减少为主，但以灌溉为主的农业耗水量依然很大[6]。图6为2000年和2015年咸海流域土地利用覆盖变

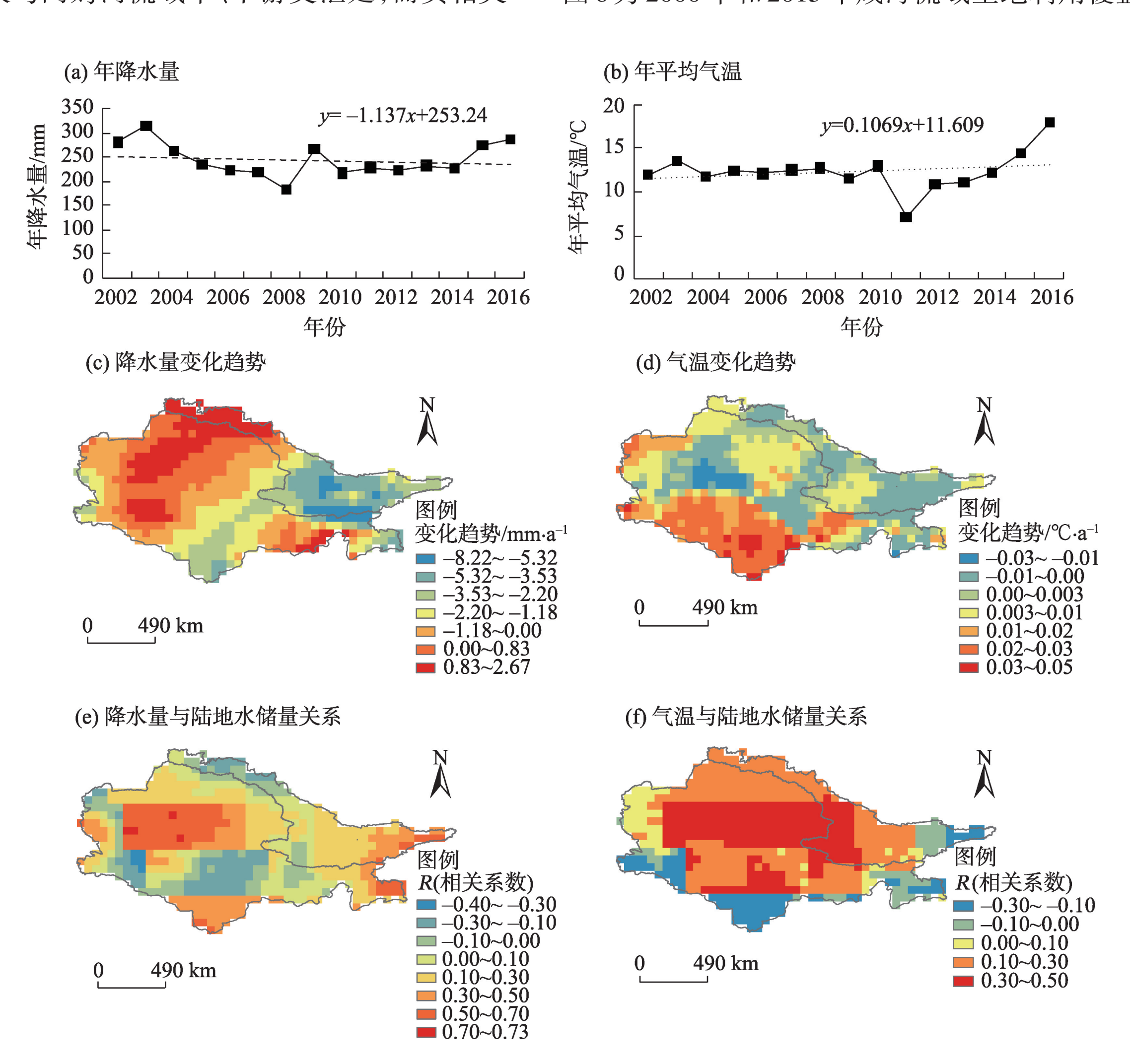


图5　咸海流域气象要素变化及其与陆地水储量变化的相关关系

Fig. 5　The variation of meteorological elements and the correlation with TWSC in Aral Sea Basin

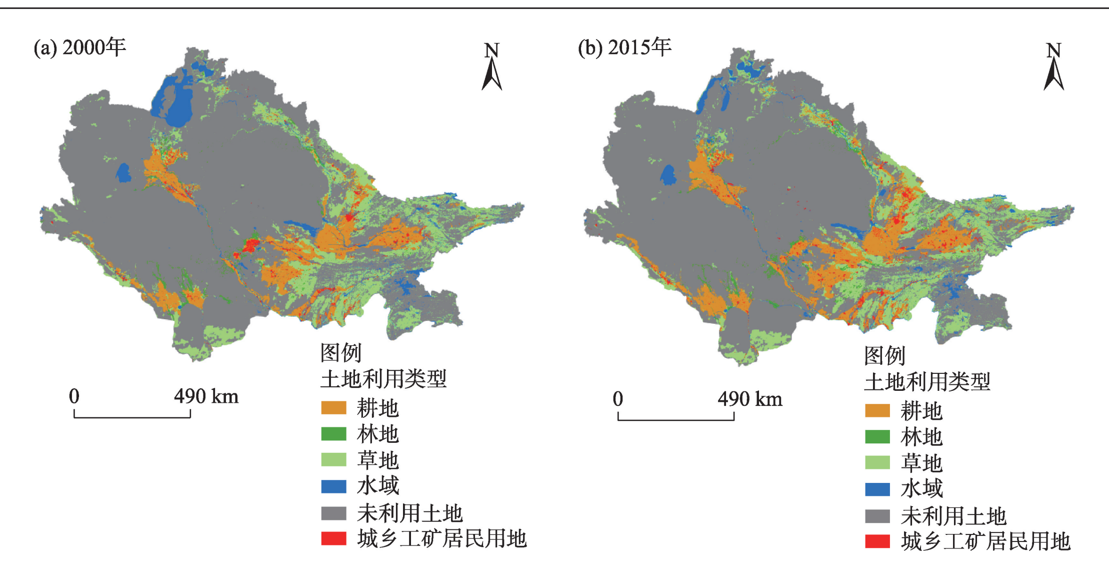


图6 2000年和2015年咸海流域土地利用覆盖变化

Fig. 6 Changes of land use cover in the Aral Sea Basin from 2000 to 2015

化图。与2000年相比,2015年咸海流域耕地、林地、城乡工矿居民用地面积均有所增加(表1),咸海流域耕地面积增加了1.65×10^4 km^2,其中阿姆河流域耕地增加了1.19×10^4 km^2,锡尔河流域增加了0.45×10^4 km^2;草地、水域面积减少,分别减少了1.52×10^4 km^{2}和1.56×10^4 km^2。

2002—2015年阿姆河流域耕地面积增加都是主要的变化,特别是在阿姆河流域中游地区,2000年至2015年新增耕地面积0.76×10^4 km^2,占阿姆河流域耕地增加总量的63.87%。不同的是,2015年锡尔河中游耕地面积较2000年小幅减少47 km^2,占锡尔河流域耕地面积变化的1.04%,阿姆河流域各分区增加面积总体大于锡尔河流域(图7a)。此外,水域面积的变化也较为显著,阿姆河流域由于南咸海的持续萎缩水体面积减小,而锡尔河流域水体面积则小幅增加;其中,锡尔河下游分区水域面积增加最多,约0.12×10^4 km^2。

已有研究表明,1960—2015年咸海面积与流域灌溉面积和水库容量呈显著的负相关关系[2]。土地利用覆盖类型和面积的变化,改变了水资源在流域中的时空配置,从而改变了整个流域水资源的平衡状态。最直接的表现就是蒸散发的变化,基于GLDAS蒸散数据的分析表明,2002—2016年咸海流域年蒸散量以21.63×10^8 m^3·a^{-1}速率增加;阿姆河流域和锡尔河流域蒸散量分别以11.02×10^8 m^3·a^{-1}、8.36×10^8 m^3·a^{-1}的速率增加。伴随着耕地和水域面积的增加(图7a),各分区蒸散量除阿姆河流域下游以-0.26×10^8 m^3·a^{-1}的速率下降之外,其他5个分区蒸散量均呈不同幅度增加(图7b~d)。而阿姆河流域下游则由于咸海萎缩导致水面蒸发持续减小,区域蒸散量呈下降趋势。锡尔河流域上、下游地区农作物种植面积增加导致蒸散量增大;而中游地区耕地和水域面积变化很小,蒸散发的变化可能更多地受气候变化的影响,升温导致蒸散量增加。

表1 2000年和2015年咸海流域及其子流域土地利用面积变化

Tab. 1 Changes in land use areas in the Aral Sea Basin and its sub-basin in 2000 and 2015 /10^4 km^2

土地利用类型	咸海流域		阿姆河流域		锡尔河流域	
	2000年	2015年	2000年	2015年	2000年	2015年
耕地	12.91	14.56	7.94	9.13	4.98	5.43
林地	2.89	3.02	1.70	1.74	1.19	1.27
草地	22.86	21.34	12.49	11.52	10.37	9.82
城乡工矿居民用地	1.95	2.40	1.14	1.40	0.80	1.00
水域	5.35	3.79	4.07	2.45	1.28	1.35
未利用土地	94.33	95.10	80.61	81.64	13.72	13.46

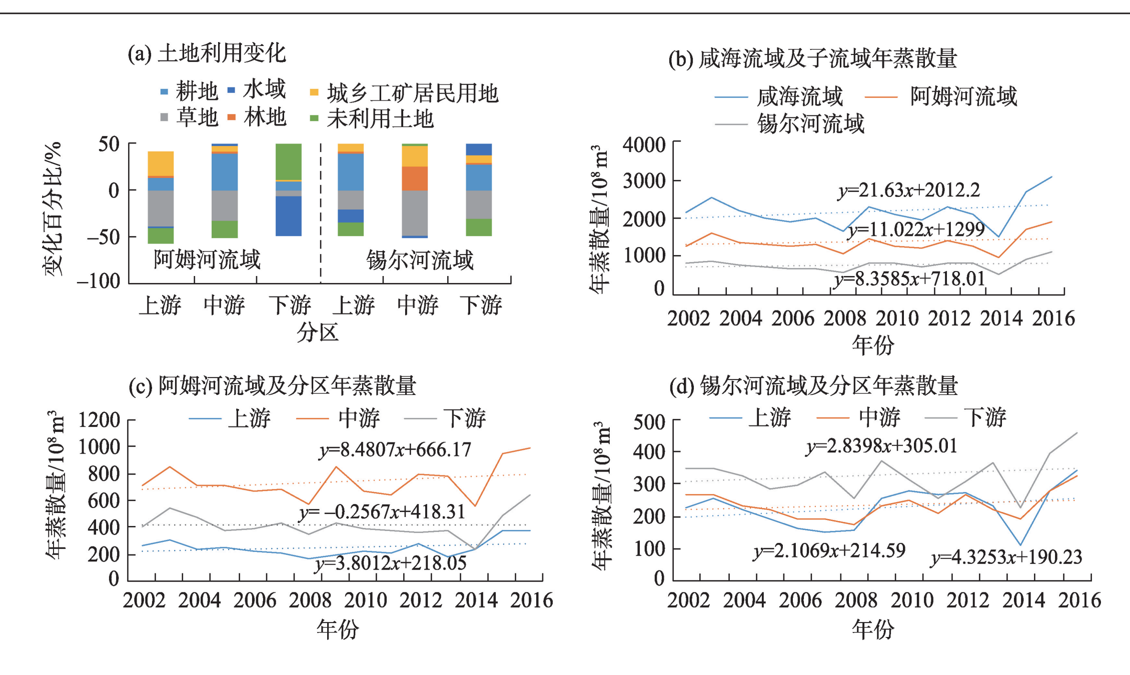


图7　咸海流域土地利用变化百分比和蒸散量变化

Fig. 7　Change percentage of land use and change of evapotranspiration in the Aral Sea Basin

综上所述，耕地和天然植被的增加，以及以灌溉为主的水库蓄水量增加，导致区域蒸散量增加，区域水储量减少；而以漫灌为主的灌溉方式也可能带来灌区地下水位的抬升，使区域水储量增加。但总体而言，耕地面积扩张带来的水资源耗散增大，陆地水储量以减小为主；在局部区域，如阿姆河流域中游地区，地下水位抬升和水库蓄水增加可能是导致区域陆地水储量增加的主要原因。流域尺度上，流域的大部分地区蒸散量呈增加的趋势，其中整个锡尔河流域和阿姆河流域的中游蒸散量大致上呈增加趋势；阿姆河流域上游山区及下游的西部蒸散量呈减少趋势（图8a）。蒸散量与陆地水储量变化的相关性强于降水量和气温，高度相关的区域在阿姆河流域中下游交界处的灌区；负相关地区在咸海流域下游西南部和锡尔河流域中下游交界处（图8b），蒸散量的增加是土地利用变化和区域升温共同影响的结果。2002—2016年各要素变化率反映了咸海流域陆地水储量呈减少态势不是单一因素造成的。降水量减少，气温升高导致蒸散增加，灌溉农业的发展、耕地面积增加导致水资源耗散，综合因素导致咸海流域整体的陆地水储量呈减少趋势（表2）。

4　结论与讨论

本文利用GRACE数据提取咸海流域陆地水储量变化时间序列，并结合区域气候要素和土地利用数据，探讨了气候变化与人类活动对流域水储量变

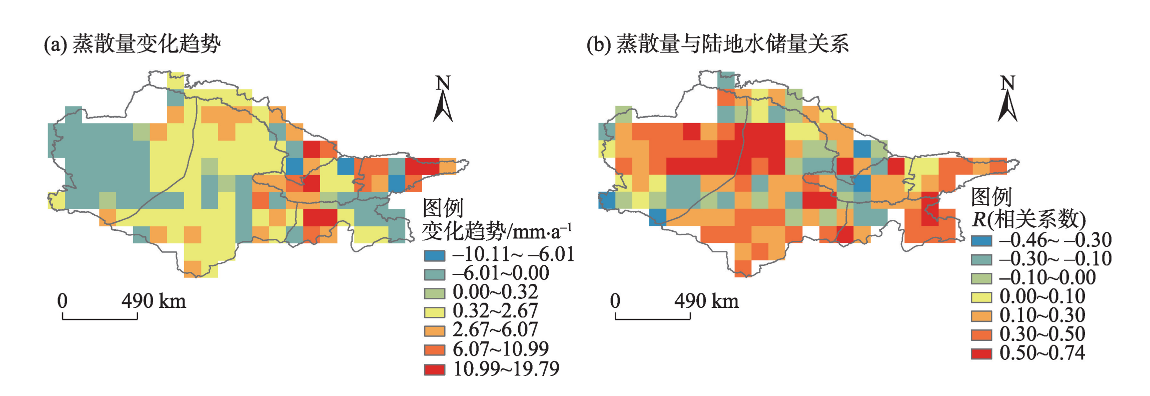


图8　咸海流域蒸散量变化及其与陆地水储量的关系

Fig. 8　Chang of evapotranspiration in the Aral Sea Basin and its relationship with TWS

表2 2000—2016年各要素的变化率

Tab. 2 Change rates of various elements from 2000 to 2016

流域		降水量/mm·a⁻¹	气温/℃·a⁻¹	陆地水储量/mm·a⁻¹	蒸散量/10^8 m³·a⁻¹	耕地/10^4 km²
咸海流域		-1.14	0.110	-3.20	21.63	1.65
阿姆河流域	上游	-2.14	0.002	-7.28	3.80	0.04
	中游	-1.07	0.010	1.79	8.48	0.76
	下游	0.27	0.005	-7.36	-0.26	0.39
锡尔河流域	上游	-3.58	-0.003	-3.81	4.33	0.15
	中游	-0.98	0.001	-6.48	2.11	-0.01
	下游	-1.02	0.001	-5.44	2.84	0.31

化的影响。得出如下主要结论：

（1）2002—2016年咸海流域陆地水储量总体呈亏损状态，其中流域西北部咸海地区陆地水储量亏损最为严重，主要原因是苏联解体后乌兹别克斯坦继续强化农业经济，阿姆河中下游农业灌溉面积继续扩张，加之持续升温的影响，区域蒸散量耗水增加[6]。

（2）陆地水储量变化与降水量的相关系数高于地表温度，气温与陆地水储量的相关性在流域大部分地区并不显著，说明地表温度不是陆地水储量变化的主导因素。

（3）2000—2015年咸海流域内农作物种植面积增加和灌溉导致水资源耗散增加，加剧了咸海流域水量输出。咸海流域年蒸散量以21.63×10^8 m³·a⁻¹速率增加，且与陆地水储量的变化相关性较强（最大相关系数0.74），是影响陆地水储量变化的主要原因之一；但由于蒸散量变化的驱动要素不仅包括气温、风速、相对湿度等气象因素，也与农作物、天然植被及水体的面积和时空分布密切相关，影响机制复杂，在目前的数据基础上很难定量区分蒸散量变化是否是陆地水储量的主要影响因素。

（4）南咸海地区由于水面持续萎缩，湖泊水储量不断减小，地下水在补充水体蒸发的同时也被抽取用于农业灌溉，导致阿姆河下游地区陆地水储量较大幅度减小；而北咸海一侧，湖泊面积和水量均小幅增加，但水体蒸发也随湖面扩张和升温而增加，加之农田、天然植被和湿地蒸散量耗水增加，锡尔河流域下游地区陆地水储量呈减小趋势，但减小幅度低于阿姆河流域下游。虽然本研究采用的是较新版本的MASCON解数据，但其对咸海流域陆地水储量的反演依然存在不确定性；同时，单一模型模拟的蒸散量数据不确定性也较大，在后续研究中，将综合RL06和RL05多版本陆地水储量数据和GLDAS中多模型模拟的蒸散发数据，开展数据比较与分析。

参考文献（References）

[1] 阿布都米吉提·阿布力克木, 葛拥晓, 王亚俊, 等. 咸海的过去、现在与未来[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 7-18. [Ablekim Abdimijit, Ge Yongxiao, Wang Yajun, et al. The past, present and feature of the Aral Sea[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 7-18.]

[2] 杨雪雯, 王宁练, 陈安安, 等. 中亚干旱区咸海面积变化与人类活动及气候变化的关联研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 681-692. [Yang Xuewen, Wang Ninglian, Chen An'an, et al. The relationship between human activities, climate change and area variation of the Aral Sea in the arid Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 681-692.]

[3] 姚俊强, 杨青, 毛炜峄, 等. 气候变化和人类活动对中亚地区水文环境的影响评估[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 222-230. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Evaluation of the impacts of climate change and human activities on the hydrological environment in Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 222-230.]

[4] Chen F H, Wang J S, Jin L Y, et al. Rapid warming in mid-latitude Central Asia for the past 100 years[J]. Frontiers of Earth Science in China, 2009, 3(1): 42-50.

[5] 龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 气候变化下新疆及咸海流域河川径流演变及适应性对策分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 377-387. [Long Aihua, Deng Mingjiang, Xie Lei, et al. Exploring analysis on the adaptive countermeasures to water resources evolvement under the climate change in Xinjiang and Aral Sea Basin[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 377-387.]

[6] 邓铭江, 龙爱华. 咸海流域水文水资源演变与咸海生态危机出路分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1363-1375. [Deng Mingjiang, Long Aihua. Evolution of hydrologic and water resources and ecological crisis in the Aral Sea Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1363-1375.]

[7] 吴敬禄, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 中亚干旱区咸海的湖面

变化及其环境效应[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 418−422. [Wu Jinglu, Ma Long, Abuduwaili Jilili, et al. Lake surface change of the Aral Sea and its environmental effects in the arid region of the Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 418−422.]

[8] 陈起川, 夏自强, 郭利丹, 等. 中亚湖泊地区降水量变化特征及趋势分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 13−16. [Chen Qichuan, Xia Ziqiang, Guo Lidan, et al. Variation characteristics and trend analysis of precipitation in Central Asia lakes zones[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(6): 13−16.]

[9] Bai J, Chen X, Li J L, et al. Changes in the area of inland lakes in arid regions of Central Asia during the past 30 years[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 178(1−4): 247−256.

[10] 成晨, 傅文学, 胡召玲, 等. 基于遥感技术的近30年中亚地区主要湖泊变化[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 146−152. [Cheng Chen, Fu Wenxue, Hu Zhaoling, et al. Changes of major lakes in Central Asia over the past 30 years revealed by remote sensing technology[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(1): 146−152.]

[11] Benduhn F, Renard P. A dynamic model of the Aral Sea water and salt balance[J]. Journal of Marine Systems, 2003, 47(1): 35−50.

[12] Gaybullaev B, Chen S C, Gaybullaev G. The large Aral Sea water balance: A future prospective of the large Aral Sea depending on water volume alteration[J]. Carbonates and Evaporites, 2014, 29(2): 211−219.

[13] Singh A, Seitz F, Schwatke C. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry[J]. Remote Sensing of Environmrnt, 2012, 123: 187−195.

[14] Yang P, Chen Y N. An analysis of terrestrial water storage variations from GRACE and GLDAS: The Tianshan Mountains and its adjacent areas, Central Asia[J]. Quaternary International, 2015, 358: 106−112.

[15] Wang F, Wang Z M, Yang H B, et al. Utilizing GRACE-based groundwater drought index for drought characterization and teleconnection factors analysis in the North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124849, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124849.

[16] Sun Z L, Long D, Yang W T, et al. Reconstruction of GRACE data on changes in total water storage over the global land surface and 60 basins[J]. Water Resources Research, 2020, 56(4): R026250, doi: 10.1029/2019WR026250.

[17] Deng Haijun, Chen Yaning, Li Yang. Glacier and snow variations and their impacts on regional water resources in mountains[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(1): 84−100.

[18] Hu Weijie, Liu Hailong, Bao Anming, et al. Influences of environmental changes on water storage variations in Central Asia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(7): 985−1000.

[19] Lin M, Biswas A, Bennett E M. Spatio-temporal dynamics of groundwater storage changes in the Yellow River Basin[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 235: 84−95.

[20] Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(8): L025285, doi: 10.1029/2005GL025285.

[21] 张园园. GRACE重力卫星的数据处理与应用[D]. 开封: 河南大学, 2017. [Zhang Yuanyuan. Data processing and application of GRACE gravity satellite[D]. Kaifeng: Henan University, 2017.]

[22] Watkins M M, Wiese D N, Yuan D N, et al. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons[J]. Journal of Geophysical Research: Soild Earth, 2015, 120(4): 2648−2671.

[23] 邹贤才, 金涛勇, 朱广彬. 卫星跟踪卫星技术反演局部地表物质迁移的MASCON方法研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4623−4632. [Zou Xiancai, Jin Taoyong, Zhu Guangbin. Research on the MASCON method for the determination of local surface mass flux with satellite-satellite tracking technique[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4623−4632.]

[24] 姚海娇, 周宏飞. 中亚五国咸海流域水资源策略的博弈分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 764−771. [Yao Haijiao, Zhou Hongfei. Game analysis of water resources strategy among the Central Asia countries around the Aral Sea Basin[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4): 764−771.]

[25] 陈曦, 姜逢清, 王亚俊, 等. 亚洲中部干旱区生态地理格局研究[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 385−390. [Chen Xi, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. Characteristics of the eco-geographical pattern in arid land of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 385−390.]

[26] 田向荣, 王国义, 樊彦芳. 咸海流域跨界水合作历史、形势及思考[J]. 边界与海洋研究, 2017, 2(6): 90−104. [Tian Xiangrong, Wang Guoyi, Fan Yanfang. Aral Sea Basin transboundary water cooperation: History, present situation and reflections[J]. Journal of Boundary and Ocean Studies, 2017, 2(6): 90−104.]

[27] 陈桃, 包安明, 郭浩, 等. 中亚跨境流域生态脆弱性评价及其时空特征分析——以阿姆河流域为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2643−2657. [Chen Tao, Bao Anming, Guo Hao, et al. Ecological vulnerability assessment for a transboundary basin in Central Asia and its spatiotemporal characteristics analysis: Taking Amu Darya River Basin as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(12): 2643−2657.]

[28] 李爱华, 崔胜玉, 王红瑞, 等. 基于GRACE卫星时变重力场模型的黄河中游地区水储量变化研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 461−473. [Li Aihua, Cui Shengyu, Wang Hongrui, et al. Water storage changes in the middle reaches of the Yellow River Basin based on GRACE time variable gravitation model[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 461−473.]

[29] 于延胜, 陈兴伟. 基于Mann-Kendall法的径流丰枯变化过程划分[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 60−63. [Yu Yansheng, Chen Xingwei. Division of variation process of high and low runoff based on Mann-Kendall method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(1): 60−63.]

Spatiotemporal variation of terrestrial water storage in Aral Sea Basin

LYU Ye[1,2,3], YANG Han[1], HUANG Yue[2,3], BAO Anming[2,3],
ZAN Chanjuan[2,3], LI Wenjing[1,2,3]

(1. School of Geography Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory GIS & RS Application of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: The Aral Sea, which was once the largest inland lake in Central Asia, is located far from oceans, and thus, a vulnerable hydrological system. The water balance in the lake has changed in recent decades under the combined impacts of climate change and anthropological activities, and problems related to limited water resources and ecological environment have attracted wide attention. Analysis of the variation trend and influencing factors of terrestrial water storage (TWS), one of the most important parameters of land water variation, can provide a scientific basis for the sustainable utilization of water resources in the Aral Sea Basin. In this paper, the spatiotemporal variations of terrestrial water storage change (TWSC) in the Aral Sea Basin are evaluated using the JPL-RL06M data collected by the GRACE gravity satellite from 2002 to 2016. CRU TS4.03 meteorological data, GLDAS-Noah surface evapotranspiration data, and high-precision land use data are combined to assess time-series changes in TWSC, precipitation, temperature, and water evaporation via the linear trend method. Using a resolution of $1° \times 1°$ pixel, we calculated the correlation coefficients of various parameters, including TWSC, precipitation, and surface temperature, to explore the effects of climate change and anthropological activities on TWS in the Aral Sea Basin. Several interesting results were obtained. (1) The TWS of the Aral Sea Basin declined at a rate of $-3.20\ mm \cdot a^{-1}$ in 2002—2016. A water surplus in spring and summer and a water deficit in autumn and winter were observed. Moreover, the TWSC of the Aral Sea Basin was characterized by a surplus in the central and eastern regions and deficits in peripheral areas. (2) Precipitation in the Aral Sea Basin in 2002—2016 decreased at a rate of $-1.14\ mm \cdot a^{-1}$, and the surface temperature increased at a rate of $0.11\ °C \cdot a^{-1}$. Precipitation and TWSC were positively correlated in most areas of the Aral Sea Basin but negatively correlated in the middle and lower reaches of the Amu Darya Basin and the lower reaches of the Syr Darya Basin. The surface temperature was negatively correlated with TWSC in most areas, but a positive correlation between these parameters was observed in some areas in the lower reaches of the Amu Darya and Syr Darya River Basins. TWSC was more strongly correlated with precipitation than with surface temperature. (3) In 2000—2015, the cultivated land area in the Aral Sea Basin increased slightly by $1.65 \times 10^4\ km^2$, but the grassland and water areas decreased. Increases in water for crop management and irrigation intensified water expenditures from the Aral Sea Basin. Under the joint influence of climate change and anthropological activities, evapotranspiration in the Aral Sea Basin increased at a rate of $21.63 \times 10^8\ m^3 \cdot a^{-1}$. The correlation coefficient between evapotranspiration and TWSC was as high as 0.74, which means this parameter may be a main factor affecting TWSC.

Key words: Aral Sea Basin; terrestrial water storage; climate change; land use change